重畳超仕上げに関する研究*

(第2報, 砥粒運動軌跡の解析と実験的考察)

早乙女 辰男^{*1}, 佐藤 啓仁^{*2}

Study on Superposition Superfinishing (2nd Report, Analysis and Consideration on Superposition Cutting Track)

Tatsuo SOUTOME^{*3} and Keijin SATO
^{*3} PILOT CORPORATION,
1-4-3 Nishiyahata, Hiratsuka-shi, Kanagawa, 254-8585 Japan

The objective of this investigation is to clarify a new and high efficient mirror machining method with using ultrasonic and low frequent vibrations, that has been named superposition superfinishing (SSF machining). At first report, it was confirmed that stock removal could be increased by providing simultaneously 20~50 Hz low frequent vibration and 28 kHz ultrasonic vibration on #3000 fine abrasive stone, and that high efficient mirror machining on this new process could be practically achieved. On this report, Average cutting speed and maximum cross angle can be calculated with analyzing the abrasive cutting track on superposition machining. And on the several experiments with changing rotational frequency, and vibration speed of abrasive stone, it is found that stock removal amount on this superposition superfinishing is strongly influenced by the cutting length better than the maximum cross angle, because the maximum cross angle is constantly made large.

Key Words: Mirror Machining, High Efficient, Superposition Superfinishing, Fine Abrasive Stone, Maximum Cross Angle, Average Cutting Speed

1. 緒 言

本研究において能率的かつ簡便な鏡面加工方法として重畳超仕上げ法(SSF法)を創案した。この方法は鏡面仕上げに適した小粒径砥粒砥石を用い、20~50 Hz程度の低周波振動と20 kHz以上の超音波振動をうまく使い分けて迅速に鏡面仕上げを行う方法である。

第1報では重畳超仕上げ装置を製作して実用的な立場から種々実験を行い、重畳振動砥石によって従来の超仕上げに比べて加工比(加工量/砥石損耗量)を同程度とし、単位時間あたりの加工能率を増大させることができることと、実際の重畳超仕上げ実験において目的とする鏡面仕上げ時間を短縮し、実用に供し得ることを確認した⁽¹⁾。

本報告では重畳振動砥粒運動軌跡の解析から平均砥粒切削速度と加工長さ増大率 K_c (重畳振動仕上げの平均切削速度/従来の超仕上げの平均切削速度)を定義

して算出し、最大交差角が単位加工長さあたり加工能率と、 K_c に対応する単位時間あたり加工量の実質増大率 K_E に及ぼす影響について考察することにした。

実験の結果、従来の低周波振動を利用した超仕上げによる加工能率は最大交差角による強い影響を受けるが⁽²⁾、これに超音波振動を重畳させることで常時最大交差角を大きくでき、おおよそ加工長さに依存した高い加工能率を示すことが分かった。そして、この結果から加工量の実質増大率 K_E は計算によって得られる増大率 K_c から単純に類推できないことも分かった。本報告ではこれらの特徴的な特性について報告する。

2. 重畳振動砥粒運動軌跡の解析

図1に重畳超仕上げ方法を示す。この方法は鏡面仕上げに適した小粒径砥粒砥石を用い、切削加工工程においては20~50 Hz程度の低周波振動に20 kHz以上の超音波振動を重畳させて砥石の切れ味を向上させ、短時間に前加工による表面粗さを除去して微細表面粗さとし、鏡面仕上げ工程では低周波振動のみの超仕上げによって迅速に鏡面加工しようとする方法である。

切削加工工程における重畳振動砥粒の運動軌跡を図2(a)に示す。周知のように工作物回転数(工作物周速度)、及び砥石に与える振動数・振幅が変化すれば砥

* 原稿受付 2008年12月15日。

^{*1} 正員, (株)パイロットコーポレーション(☎254-8585 平塚市西八幡1-4-3)。

^{*2} 正員, 宇都宮大学工学部(☎321-8585 宇都宮市陽東7-1-2)。
E-mail: t-soutome@pilot.co.jp

粒と被削材の相対運動軌跡が異なり、平均砥粒切削速度と最大交差角が変化する。従って最大交差角が加工量に及ぼす影響を把握するためには切削長さを同じくして考察するのが適切である。図中、

F, A^{0-P} [Hz, mm]: 砥石の低周波振動数, 振幅

f, a^{0-P} [kHz, μ m]: 砥石の超音波振動数, 振幅

N [rpm]: 工作物回転数

ϕD [mm]: 工作物直径

を示す。

工作物周速度は $V_N = \pi DN / 1000$ [m/min] で示され、低周波振動砥石単独の1 minあたり最大振動速度は図中 V_{1v} 式が示すように、 $60 \times 2\pi AF$ [mm/min] $= 120\pi AF / 1000$ [m/min] であるからこれと浅枝の式⁽³⁾から低周波振動砥粒の平均切削速度 $\bar{V}_1$ [m/min] と最大交差角 θ_1 を求めると、

$$\bar{V}_1 = (2/1000) [(DN)^2 + (120AF)^2]^{1/2} \times \int_0^{\pi/2} (1 - \sin^2 \theta_1 \sin^2 \psi_1)^{1/2} d\psi_1 \dots (1)$$

f, a : Ultrasonic vibration, P : Stone pressure
 F, A : Vibration of low frequency

Fig. 1 Superposition superfinishing process

$$\theta_1 = \tan^{-1}(120AF/DN) \dots (2)$$

を得る。同様に、超音波振動砥粒の平均切削速度 $\bar{V}_2$ [m/min] と最大交差角 θ_2 は図中 V_{2v} 式を利用して

$$\bar{V}_2 = (2/1000) [(DN)^2 + (120af)^2]^{1/2} \times \int_0^{\pi/2} (1 - \sin^2 \theta_2 \sin^2 \psi_2)^{1/2} d\psi_2 \dots (3)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}(120af/DN) \dots (4)$$

として表される。 ψ_1, ψ_2 は両振動の位相角を示す。

重畳振動砥粒の運動軌跡における平均切削速度 $\bar{V}_3$ は簡略化して次のようにして求めることにする。

図2(b)に示すように低周波振動、超音波振動砥粒の平均振動速度 $\bar{V}_{1v}, \bar{V}_{2v}$ をそれぞれ単独に求めて加算し、これに工作物周速度 V_N を速度合成して重畳振動砥粒の平均速度 $\bar{V}_3$ を求める。 $\bar{V}_{1v}, \bar{V}_{2v}$ は(1), (3)式における $\theta_1, \theta_2 = 90^\circ, N = 0$ の場合で、

$$\int (1 - \sin^2 \theta \sin^2 \psi)^{1/2} d\psi$$

の第2種完全楕円積分項は1となるため、それぞれ、

$$\bar{V}_{1v} = 240 \cdot AF / 1000 \dots (5)$$

$$\bar{V}_{2v} = 240 \cdot af / 1000 \dots (6)$$

を得る。直接的に各々の砥石振動速度 V_{1v}, V_{2v} から平均速度を求めても同一の結果を得る。したがって重畳振動砥粒の平均切削速度 $\bar{V}_3$ と最大交差角 θ_3 は、(5), (6)式と工作物周速度 V_N から

$$\bar{V}_3 = 1/1000 [240^2 (AF + af)^2 + (\pi DN)^2]^{1/2} \dots (7)$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} [120(AF + af)/DN] \dots (8)$$

として表される。

ここで $K_c = \bar{V}_3 / \bar{V}_1$ を重畳振動砥粒による加工長さの増大率として定義し、(1)式の平均切削速度 $\bar{V}_1$ を

$$\bar{V}_1 = 1/1000 [(240AF)^2 + (\pi DN)^2]^{1/2} \dots (9)$$

と簡略化し、これと(7)式から K_c を求めると、

F, A : Frequency, and amplitude of low frequent vibration
 f, a : Frequency, and amplitude of ultrasonic vibration
 N : Rotational frequency of work
 ψ_1 : Phase angle of low frequent vibration
 ψ_2 : Phase angle of ultrasonic vibration

V_{1v} : Low frequent vibration speed
 V_{2v} : Ultrasonic vibration speed
 θ_1 : Inclined angle of low frequent vibration track
 θ_2 : Inclined angle of ultrasonic vibration track

Fig. 2 Cutting track on superposition superfinishing

Fig. 3 Relation between rotational frequency (N), vibration speed (af) and rate of magnification (K_c)

Fig. 4 Ultrasonic stone vibration system

Fig. 5 Superposition superfinishing device

Table 1 Experimental conditions

Superposition superfinishing		Work
Frequency F	0 ~ 25Hz	Material :SKS3(HrC47)
f	0 ~ 46kHz	Profile :
Amplitude A^{0-P}	0 ~ 1mm
a^{0-P}	0 ~ 7.5μm	
Pressure P	98kPa	
Rotational frequency N	60 ~ 950rpm	
Superfinishing stone	WA3000RH(30,50)	
Machining fluid	Light oil	

$$K_c = \{1 + [2(af/AF) + (af/AF)^2] / [1 + (\pi DN / 240 AF)^2]\}^{1/2} \dots \dots \dots (10)$$

を得る。工作物回転数 N と超音波振動速度項 af を変化させた場合の増大率 K_c の傾向線図を図3に示す。回転数変化線図において $N=0$ のとき $K_c=1 + af/AF$, $N=\infty$ のとき $K_c=1$ を示す。超音波振動変化線図は $af=0$ のとき $K_c=1$ を始点として上昇する線図を示す。本報告では以上の算出結果を基に、実験によって得られる単位時間、および単位加工長さあたりの加工能率と単位時間あたり加工量の実質増大率 K_E を求めて考察することにした。

3. 実験装置および実験条件

図4に試作した超音波砥石振動系と、それに関連して工作物とその取り付け方法を示す。フェライト磁歪振動子に炭素鋼材、ジュラルミンで試作した振幅拡大用ホーンの大面积部を接着・固定し、ホーン小面積部先端には三次の曲げ振動姿勢で共振する振動砥石シャックをねじ結合した。シャックの両端には10mm角の超仕上げ用砥石を接着・固定した。本報告では超音波振動数 f , 振幅 a を変化させた実験も行うために、超音波振動数 $f=20\text{ kHz}$, 28 kHz , 46 kHz で共振が得られる各種砥石振動系を試作した。図中に写真を示す。

図5に重畳超仕上げ装置を示す。低周波振動の駆動源として400Wの三相誘導電動機を用い、低周波振動数 F をプーリーの変換により、振幅 A を偏心カム機構によってそれぞれ数段階に変えられるようにした。低周波振動軸端部にスプリング方式による砥石加圧装置を固定し、さらにこの装置に図4に示した超音波砥石振動系を取り付け、超音波振動砥石の振動方向が低周波振動方向と同方向となるように調整したのが図の重畳超仕上げ装置である。

実験はこの装置を池貝鉄工所製EC-16型旋盤の往復台上に取り付け、図4中の工作物固定アーバーを旋

盤主軸に取り付けて行えるようにした。実験条件を表1に示す。工作物は外径 $\phi 35$ mm, 幅 10 mm のSKS3 ($H_R C47$) を用い, 工作物外周の前加工表面粗さを円筒研削によって $2.3 \sim 2.5 \mu m R_z$ に仕上げた。実験の際は工作物外周の振れが $2 \mu m$ 以内となるように固定する。加工量は実験毎に切削開始から 30 sec, 1 min 以降は 1 min 間隔で, 直交する 2 箇所の工作物直径をマイクロメータによって測定して平均値を求め, その直径の減少量 (ΔD [μm]) をもって加工量とした。

4. 実験結果および考察

以下の考察において従来の超仕上げ(SF), 超音波振動仕上げ(UC), 重畳超仕上げ(SSF), SSFの切削加工工程である重畳振動仕上げ(SVC)を()内の記号によって呼称する。ここに, $SVC(=SF+UC)$ は同時加工, $SSF(=SVC+SF)$ は順次加工を示す。

4・1 工作物回転数が加工量に及ぼす影響 図6に工作物回転数 N と加工量 ΔD の関係を示す。低周波振動数, 振幅を $F=25$ Hz, $A=0.75$ mm, 超音波振動数, 振幅を $f=28$ kHz, $a=7.5 \mu m$ と固定し工作物

Fig. 6 Influence of rotational frequency (N) on stock removal (ΔD) [SF: $F=25$ Hz, $A=0.75$ mm, UC: $f=28$ kHz, $a=7.5 \mu m$, SVC: SF+UC, $N=60 \sim 950$ rpm, $P=98$ kPa, WA # 3000 RH 30, SKS 3 ($H_R C 47$)]

回転数 N を変化させた。前報において, すでに $N=235 \sim 600$ rpm の実験結果を報告しているが, 本報では加工長さ(平均砥粒切削速度 $\bar{V}$)と最大交差角 θ が加工量に及ぼす影響をさらに広範囲に考察するために $N=60 \sim 950$ rpm の範囲で実験結果を追加して示した。

SFにおいては工作物回転数 N の高い順に目づまり現象を起こすため, 所定の時間経過の後には回転数の低い順に大きな加工量を示すことになる。特に 60 rpm においては直線的な増加傾向を示して加工量が増加する現象が観察される。一方 SVC においては 950 rpm においてのみ 2 min 以降増加比率が減少するが, それ以外ではいずれも直線的な増加傾向を示して, その線図の傾きは N の大きさに伴って大きくなる。加工開始後 2 min における SVC と SF の加工量を回転数毎に比較すると SVC の加工量は SF に対し, $N=60$ rpm において最小で 1.7 倍, $N=950$ rpm において最大の 16 倍を示す。

4・2 低周波振動速度が加工量に及ぼす影響 低周波振動振幅を $A=0.75$ mm と固定して, 振動数を $F=0, 12.5, 25$ Hz と変化させた場合と, 振動数を $F=25$ Hz と固定して, 振幅を $A=0, 0.25, 0.5, 0.75$,

Fig. 7 Influence of stone vibration speed (AF) on stock removal (ΔD) [SF: $F=0 \sim 25$ Hz ($A=0.75$ mm), $A=0 \sim 1$ mm ($F=25$ Hz), UC: $f=28$ kHz, $a=7.5 \mu m$, SVC: SF+UC, $N=375$ rpm, $P=98$ kPa, WA # 3000 RH 30, SKS 3 ($H_R C 47$)]

Fig. 8 Influence of stone vibration speed (af) on stock removal (ΔD) [UC: $f=0\sim 46$ kHz ($3\ \mu\text{m}$), $a=0\sim 7.5\ \mu\text{m}$ ($f=28$ kHz), SF: $F=25$ Hz, $A=0.75$ mm, SVC: SF+UC, $N=375$ rpm, $P=98$ kPa, WA# 3000 RH 50, SKS 3 ($H_{RC} 47$)]

1 mm と変化させた場合の SF と、これに振動数 $f=28$ kHz, 振幅 $a=7.5\ \mu\text{m}$ の超音波振動を重畳した SVC による加工量を図 7 に示す。

本報告では砥石振動速度による加工量の変化を見るため、便宜的に $AF (=A \times F)$ を振動速度として表記する。図では、 $AF (25\ \text{Hz} \times 0.75\ \text{mm}) = 18.75\ \text{mm/sec}$ を基準にして A を変化させた場合は A_F (A を小サイズ), F を変化させた場合は F_A (F を小サイズ) で表記した。SF において $AF = 18.75\ \text{mm/sec}$ 以下とすると加工開始後 2 min 以降、砥石が目づまり現象を呈し、僅か $4\ \mu\text{m}$ の加工量に止まる。 $AF = 25\ \text{mm/sec}$ とすると目づまりは見られず曲線的な増加傾向を示し、2 min において $15\ \mu\text{m}$ の加工量を得る。SVC では $AF = 9.375\ \text{mm/sec}$ 以下において加工開始 2 min 経過以降、加工量の増加が見られなくなるが、 $AF = 12.5\ \text{mm/sec}$ 以上では図のように直線的な増加を示し $AF = 25\ \text{mm/sec}$ における 2 min 時の加工量は $22\ \mu\text{m}$ に増大する。SVC, SF における 2 min 時の加工量を振動速度毎に比較すると SVC は SF に対し 1.5 倍 ($AF = 25\ \text{mm/sec}$) $\sim$ 4 倍 ($AF = 6.25\ \text{mm/sec}$) に増大するのが分かる。

ここで、SVC による加工量は低周波振動と超音波振動それぞれ単独によって得られる加工量の和より大きな加工量を示すことが観察される。例えば、加工開始 2 min 経過時の SVC における $AF=0$ (UC 仕上げ) による加工量 $4\ \mu\text{m}$ と SF における $AF=25\ \text{mm/sec}$ による SF の加工量 $15\ \mu\text{m}$ を加え合わせると $19\ \mu\text{m}$ となり、SVC による $AF=25\ \text{mm/sec}$ の加工量 22

μm よりも小さな加工量を示す。このように $AF = 12.5\ \text{mm/sec}$ 以上の低周波振動砥石に $f=28$ kHz, $a=7.5\ \mu\text{m}$ の超音波振動を重畳させることで加工量に顕著な違いが観察されるようになる。

SF, SVC において $AF = 6.25\sim 12.5\ \text{mm/sec}$ において逆転する現象が見られるが、おおよそ振動速度 AF を高めると加工量は増加する傾向を示す。

4.3 超音波振動速度が加工量に及ぼす影響 低周波振動数、振幅を $F=25\ \text{Hz}$, $A=0.75\ \text{mm}$ とし、超音波振動振幅を $a=3\ \mu\text{m}$ と固定して振動数のみを $f=0, 20, 28, 46\ \text{kHz}$ と変化させた場合と、振動数を $f=28\ \text{kHz}$ と固定にして $a=0, 3, 5, 7.5\ \mu\text{m}$ と変化させた場合の加工量を図 8 に示す。図中の線図記号は図 7 と同じようにして、砥石振動速度と加工量との関係を見るために、 $af (=a \times f)$ を振動速度として表記した。さらに、 $af (28\ \text{kHz} \times 3\ \mu\text{m}) = 84\ \text{mm/sec}$ を基準に、 f を固定して a を変化させた場合は a_f (a を小サイズ) によって表示し、 a を固定して f を変化させた場合は a_f (f を小サイズ) として表記した。図中 $af=0\ \text{mm/sec}$ は SF を示す。 $af=138\ \text{mm/sec}$ と $af=140\ \text{mm/sec}$ において逆転する現象が見られるが、おおよそ振動速度 af を高めることで加工量は増加現象を示す。時間経過に伴い、いずれも加工量の増加比率が低下する。 $af=210\ \text{mm/sec}$ における 2 min 経過時の加工量は $af=0\ \text{mm/sec}$ の SF 加工に比べて約 2.5 倍に増大する。田中らが砥粒振幅を小さくすると加工能率が低下することを指摘しているように⁽⁴⁾、本実験の結果においても振動速度が加工量に影響を及ぼしているのが観察される。周知のように砥粒の脱落、破碎を促進させて加工能率に強い影響を及ぼす要因の一つとし最大交差角があり、この交差角を決定する因子の一つが振動速度であることに起因しているものと考えられる。実験結果から砥石振動速度を更に高めれば、その増加に伴って砥粒の脱落と破碎が促進されてより加工量が増加することが予測される。今後の研究において加工能率を高める一手段として重要であるが、本研究では振動速度が加工量に及ぼす影響を考察することにあるので $af=210\ \text{mm/sec}$ に止めることにした。

4.4 最大交差角と平均砥粒切削速度、および単位時間あたり加工能率との関係 図 9 に砥石の低周波振動速度 AF , 超音波振動速度 af と工作物回転数 N を変化させた場合の最大交差角 θ と平均砥粒切削速度 $\bar{V}$ [m/min], 及び単位時間あたり加工能率 RM [$\mu\text{m}/\text{min}$] との関係を示す。加工能率線図は図 6 $\sim$ 図 8 における加工量を読み取ってプロットした。加工量

Fig. 9 Relation between maximum cross angle (θ) and average cutting speed ($\bar{V}$), rate of stock removal (RM)

線図の増加割合はおおよそ時間の経過に伴い減少傾向を示すため、読み取る時間によって加工能率が異なることになる。本報告では加工開始後2minの加工量を読み取って単位時間あたり加工能率 $[\mu\text{m}/\text{min}]$ を比較することにした。

SVCにおいて、 $N=60\sim 950\text{ rpm}$ ($F=25\text{ Hz}$, $A=0.75\text{ mm}$, $f=28\text{ kHz}$, $a=7.5\mu\text{m}$)と変化させて得られる θ_3 は $40\sim 86^\circ$ の範囲で変化し、これに対応する $\bar{V}_3$ は図中① $V_3-\theta_N(\text{SVC})$ 線図によって示される。SVCによる加工能率線図③ $RM_3-\theta_N(\text{SVC})$ は $\theta_3=40\sim 79^\circ$ ($N=150\sim 950\text{ rpm}$)における平均切削速度の変化傾向と同様な変化を示すが、 $\theta_3=79^\circ$ ($N=150\text{ rpm}$)を越えると急激に減少する。田中らが考察⁽⁵⁾しているように、最大交差角が大きすぎると砥粒単独、あるいは各砥粒の運動軌跡が相互に交差する回数すなわち多重性は増加するが、すでに切削された切削痕付近を重複して切削することになるため実質的にあまり研削量が得られない、いわゆる空振り現象が促進される結果に起因しているものと考えられる。

一方、SFにおける θ_1 は $N=60\sim 950\text{ rpm}$ ($F=25\text{ Hz}$, $A=0.75\text{ mm}$)に対応し $\theta_1=4\sim 47^\circ$ の範囲で変化する。 $\bar{V}_1$ の算出結果はこの変化に伴いSVC以上に急激な変化を示す② $V_1-\theta_N(\text{SF})$ 線図によって示される。これに対応する加工能率は④ $RM_1-\theta_N(\text{SF})$ 線図によって示され、SVCで見られるような平均切削速度線図と同様な変化傾向は見られない。すなわち、 θ_1 の大きい範囲においては加工長さ(平均砥粒切削速度)が小さくなるが、砥粒の脱落、破碎を活発にできるため加工能率 RM_1 は② $V_1-\theta_N(\text{SF})$ 線図のように低下しない。 θ_1 の小さい範囲では加工長さを大きくできる一方で砥石砥粒の脱落、破碎が減少して砥石の切れ味が低下するために加工能率は②線図のように増加

しない。そのように、SFにおいては加工長さと最大交差角による砥石の切れ味が相殺して図示のような変化の少ない加工能率線図を示すものと考えられる。

超音波振動速度を $af=0\sim 210\text{ mm}/\text{sec}$ ($F=25\text{ Hz}$, $A=0.75\text{ mm}$, $N=375\text{ rpm}$)と変化させた場合の平均切削速度線図⑤ $V_3-\theta_{af}(\text{SVC})$ は② $V_1-\theta_N(\text{SF})$ 線図における $N=375\text{ rpm}$ ($\theta_1=10^\circ$)の $\bar{V}_1$ と① $V_3-\theta_N(\text{SVC})$ 線図における $N=375\text{ rpm}$ ($\theta_3=64^\circ$)の $\bar{V}_3$ を結んだ線図を示す。これに対応した加工能率線図⑥ $RM_3-\theta_{af}(\text{SVC})$ の変化傾向は図示のごとく概略⑤ $V_3-\theta_{af}(\text{SVC})$ 線図の変化傾向に近い傾向を示し、前記した③ $RM_3-\theta_N(\text{SVC})$ 線図が① $V_3-\theta_N(\text{SVC})$ 線図に近い傾向を示すのと同じように、加工長さに依存するような加工特性を示しているものと考えられる。

低周波振動速度を $AF=0\sim 25\text{ mm}/\text{sec}$ ($f=28\text{ kHz}$, $a=7.5\mu\text{m}$, $N=375\text{ rpm}$)と変化させた場合のSVC, SF両者の平均砥粒切削速度はそれぞれ⑦ $V_3-\theta_{AF}(\text{SVC})$, ⑧ $V_1-\theta_{AF}(\text{SF})$ 線図によって示される。加工能率線図は平均切削速度線図とは異なり、 θ に対し敏感に変化を示す⑨ $RM_3-\theta_{AF}(\text{SVC})$, ⑩ $RM_1-\theta_{AF}(\text{SF})$ 線図によって示される。SFにおけるこの敏感な変化は、まず低周波振動速度を大きくすることによる最大交差角の増大に起因していることが考えられる。さらに振動砥石の振動数、振幅それぞれに着目すると、振動数の増加による運動軌跡交差回数の増加と振幅を大きくすることによる運動軌跡上、交差に関与する砥粒数の増加が考えられる。そのように各砥粒運動軌跡上の砥粒相互の多重性が増大し、より微細に切りくずを生成することで切削力を低減させる表面微細みぞ自成機構⁽⁶⁾が作用して加工能率が促進されるものと考えられる。この現象はSVCにおいても、同様な考察がなされる。すなわち超音波振動砥粒による運動軌跡

の多重性に、前述した低周波振動による砥粒相互の多重性の増大効果が加わって、より狭い交差角範囲で急激な加工能率の増減が観察されるものと考えられる。

以上のように SF による加工量は加工長さにあまり依存しないことと、低周波振動速度 AF の影響を強く受けて最大交差角 θ の狭い範囲で加工能率が急激に増減する現象を示す。

一方 SVC においては加工能率線図③において考察したように広範囲の N において常時 θ を大きくできて砥粒の脱落、破碎を活発にできるため、加工長さ(平均砥粒切削速度)に依存した加工能率が得られることを示す。そして、低周波振動速度の変化に対しては SF と同じように加工長さに依存しない現象を示すことが分かった。

4.5 単位加工長さあたり加工能率、および加工長さ増大率と加工量の実質増大率 図10は図9における単位時間あたり加工能率 RM [$\mu\text{m}/\text{min}$] を平均切削速度 $\bar{V}$ で除した単位加工長さあたり加工能率 RL [$\mu\text{m}/\text{m}$] と SVC の SF に対する加工長さの増大率 K_c 、及び加工量の実質増大率 K_E を N の関係で示したものである。 N を変化させたときの SVC の加工能率 RL_3 は $N=150\sim 950$ rpm ($\theta_3=40\sim 79^\circ$) の範囲においてほぼ $0.09\sim 0.1 \mu\text{m}/\text{m}$ と一定の加工能率を示し、 $\theta_3=79^\circ$ を越えた、 $N=95$ rpm 以下では急激な減少傾向を示す。

SF の加工能率 RL_1 は N を小さく ($\theta_1 \rightarrow$ 大) するに伴い $N=60$ rpm ($\theta_1=47^\circ$) で最大値 $0.18 \mu\text{m}/\text{m}$ を示し、SVC の $N=60$ rpm における $RL_3=0.045 \mu\text{m}/\text{m}$ に対し 4 倍の加工能率を示す。増大率 K_c は N を大きくすることで減少傾向を示すが、SF に対する SVC の実質加工量増大率 K_E はこの結果に反し増加現象を

Fig. 10 Relation between rotational frequency (N) and rate of magnification (K_c , K_E), rate of stock removal (RL) [SF: $F=25$ Hz, $A=0.75$ mm, UC: $f=28$ kHz, $a=7.5 \mu\text{m}$, $N=60\sim 950$ rpm, $P=98$ kPa, WA # 3000 RH 30, SKS 3 ($H_{RC} 47$)]

示して、 $N=950$ rpm で 16 を示す。この結果は単位時間あたり加工量の実質増大率 K_E が、

$$K_E = (\bar{V}_3 \times RL_3) / (\bar{V}_1 \times RL_1) = K_c \times (RL_3 / RL_1)$$

で表されることより、加工能率 RL_1 が増加すれば K_E が減少することから理解される。 $N=150\sim 375$ rpm の範囲では計算によって求めた K_c 線図にやや近い傾向を示し、この範囲における SF の加工は比較的適正な砥粒の脱落と破碎現象を伴いながら加工長さに依存した加工が行われている結果によるものと推測される。

図11に超音波振動速度 af と増大率 K_c , K_E 、及び加工能率 RL との関係を示す。増大率 K_c は SF の平均切削速度に対し超音波振動を変化させたときの平均切削速度の比率を増大率としたものである。図において実質増大率 K_E は K_c 線図と同様に右上がりの傾向

Fig. 11 Relation between stone vibration speed (af) and rate of magnification (K_c , K_E), rate of stock removal (RL) [SF: $F=25$ Hz, $A=0.75$, UC: $f=0\sim 46$ kHz ($3 \mu\text{m}$), $a=0\sim 7.5 \mu\text{m}$ ($f=28$ kHz), SVC: SF+UC, $N=375$ rpm, $P=98$ kPa, WA # 3000 RH 50, SKS 3 ($H_{RC} 47$)]

Fig. 12 Relation between stone vibration speed (AF) and rate of magnification (K_c , K_E), rate of stock removal (RL) [SF: $F=0\sim 25$ Hz ($A=0.75$), $A=0\sim 1$ mm (25 Hz), UC: $f=28$ kHz, $a=7.5 \mu\text{m}$, $N=375$ rpm, $P=98$ kPa, WA # 3000 RH 30, SKS 3 ($H_{RC} 47$)]

を示し、その増加割合は K_c 線図より大きい。この現象は図中 af を高めることで RL_3 がわずかに上昇する傾向を考え合わせると、SVC によって加工長さを大きくできることとは別に、振動速度 af を高めることで砥粒の脱落、破碎が促進されることによる加工量の増加が加味される結果によるものと考えられる。

図 12 に低周波振動速度 AF と増大率 K_c , K_E および加工能率 RL との関係を示す。加工能率 RL_1 , RL_3 は両者とも AF を高めることで右上がりの線図を示すが、 $AF=18.75$ mm/sec ($F=25$ Hz, $A=0.75$ mm) 以上においては RL_3 よりも RL_1 線図の増加割合が大きくなるのがわかる。 K_E 線図は図示のように大きな変動を示しているが、そのプロット点から平均直線を求めると変化の少ない K_c 線図とは異なり右下がりの線図を描く。この現象を直線で示すのはやや正確さに欠けるものの、単位時間あたり加工量の実質増大率 K_E が図 10 において考察したように $K_E=K_c \times (RL_3/RL_1)$ で表され、加工能率 RL_1 が増加すれば K_E が減少することにより、概略合致する現象として理解される。

5. 結 言

本報告では従来の低周波振動のみの超仕上げ(SF)に超音波振動を重畳した重畳振動仕上げ(SVC)における平均切削速度 $\bar{V}_3$ と加工長さ増大率 K_c を算出し、実験によって最大交差角が単位加工長さあたり加工能率 RL と単位時間あたり加工能率 RM 、および実質増大率 K_E に及ぼす影響を考察し次のような結論を得た。

(1) 工作物回転数 N を変化させた場合、SF においては最大交差角が加工能率に強い影響を及ぼしているが、SVC においては最大交差角を常時大きくできるため加工長さ(平均砥粒切削速度)に依存した加工能

率を示す。

(2) 計算によって求めた平均砥粒切削速度の増大率 K_c は工作物回転数を高めることで減少するが、実験によって得られる単位時間あたり加工量の実質増大率 K_E は、一部の範囲を除き K_c 線図に反し増大する結果を得た。この結果は、SF 加工の場合加工長さよりも最大交差角 θ の影響を強く受ける(1)の結果に起因しているものと考えられる。

(3) 超音波振動速度 af を高めることで、 K_E は K_c に比較し増加比率の大きい線図を示す。このことは af の小さい領域においては SF の加工特性を示し、 af の大きい領域においては SVC の加工特性を示す結果によるものと考えられる。

(4) SF, SVC 両仕上げにおいて、単位時間あたり加工能率 RM は低周波振動速度 AF の影響を強く受け最大交差角 θ の狭い範囲で急激に増減する現象を示す。

本研究を進めるにあたり、終始ご指導を戴いた故宇都宮大学隈部淳一郎教授にお礼を申し上げます。

文 献

- (1) Soutome, T. and Sato, K., Study on Superposition Superfinishing (1st Report), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 75, No. 751 (2009), pp. 741-748.
- (2) Asaeda, T., Researchs on Superfinishing, *Research Laboratory for Precision Machinery*, (1950), p. 12, Tokyo Institute of Technology.
- (3) 文献(2)の p. 35.
- (4) Tanaka, Y., Yano, A. and Shinke, N., Study on Ultrasonic Grindining (1st Report), *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 34, No. 10 (1968), p. 691.
- (5) 文献(4)の p. 691.
- (6) Kumabe, J., *Fundamentals and Application of Vibration Cutting*, (1979), p. 84, Jikkyo Publishing Co. Ltd., Japan.